Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 241-250

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۲۵۰-۲۴۱

مقاله علمی-پژوهشی

اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسیدسالیسیلیک بر تعدیل اثرات مخرب تنش کمبود آب در ذرت دانه‌ای سینگل کراس ۷۰٤ (*Zea mays* L.)

فانزه شرقی[1]، ابراهیم خلیل وند بهروزیار[2]*

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۰۳

چکیده

به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک بر تعدیل اثرات مخرب تنش کمبود آب در ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، آزمایشی به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز طی سال زراعی ۱۳۹۷ اجراشد. عامل اصلی تنش کمبود آب در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد رطوبت قابل دسترس و ترکیب فاکتوریلی کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم ($n\text{-}TiO_2$) (در سه سطح صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۳ درصد) و اسید سالیسیلیک (SA) (در دو سطح صفر و نیم درصد) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ و SA تحت سطوح مختلف تنش کمبود آب بر صفات فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال پنج درصد و محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر محلول‌پاشی SA تحت تنش کمبود آب بر صفت سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ در سطوح مختلف تنش کمبود آب نیز بر صفت سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد و اثر محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ و SA نیز بر صفت سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. نتایج نشان داد که محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم تحت شرایط ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس بیشترین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را داشت. همچنین محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۵ درصد اسید سالیسیلیک تحت رطوبت ۵۰ درصد قابل دسترس بیشترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را به خود اختصاص داد. کاربرد ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۵ درصد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل در مقایسه با عدم کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک تحت آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس به‌ترتیب ۷۹ درصد، ۲/۵ برابر و ۸۲ درصد محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل را افزایش داد. در این مطالعه کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسیدسالیسیلیک با افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز موجب تعدیل اثرات منفی تنش کمبود آب گردید. همچنین با توجه به این‌که نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم و اسید سالیسیلیک بر آنزیم‌های تاثیرگذار بر فیزیولوژی گیاه اثرات مثبتی داشتند از این رو میزان تولید دانه ذرت نسبت به شاهد و شرایط کم آبیاری افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان داد.

واژه‌های کلیدی: آسکوربات پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، محتوای کلروفیل، محلول‌پاشی

مقدمه

تنش کمبود آب یکی از مهم‌ترین علل کاهش بهره‌وری کشاورزی در سراسر جهان است (Kamanga *et al.*, 2018) که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین تنش‌های غیر زنده در مقیاس جهانی مورد پذیرش قرار گرفته است (Ahmad, 2016). با توجه به اثرات خشکی در عملکرد محصولات کشاورزی در پایان قرن ۲۱ در مقایسه با شرایط فعلی، افزایش ریسک از دست دادن عملکرد ۹-۱۲ درصد برای گندم و ۵-۶ درصد برای ذرت پیش‌بینی شده است (Leng and Hall, 2019). فتوسنتز، تعرق و هدایت روزنه‌ای از مهم‌ترین فرآیندهای تاثیرپذیر از تنش کمبود آب هستند (Anjum, 2011). تنش کمبود آب در گیاهان ارتباط سلول و آب را مختل کرده و به‌تبع آن فرآیندهای فیزیولوژیکی و در نهایت تولید گیاه به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Aref, 2013). نانو ذرات، ذراتی با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند که به‌دلیل سطح ویژه زیاد، واکنش‌پذیری بالایی دارند و همین ویژگی موجب تسهیل جذب آن‌ها در مقیاس نانو می‌شود (Fadeel *et al.*, 2017). نانو ذره دی‌اکسید تیتانیوم ($n\text{-}TiO_2$) از لحاظ فراوانی نهمین عنصر موجود در پوسته زمین است و به‌عنوان یکی از نانو بلورهای نیمه‌هادی اکسید فلزی، جایگاه ویژه‌ای در جهان صنعتی امروز یافته و به علت ویژگی‌های الکتریکی، نوری و فوتوکاتالیستی خوبی که دارد توجه بسیاری از

۱- کارشناس ارشد زراعت، گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
۲- استادیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: e.khalilvand@iaut.ac.ir)
DOI: 10.22067/gsc.v18i2.81953

دانشمندان در حوزه‌های مختلف ازجمله کشاورزی را به خود جلب کرده و امیدواری‌هایی را برای غلبه بر برخی مسائل در بخش کشاورزی به‌وجود آورده است (Khan *et al.*, 2017). این ترکیب ازجمله موادی می‌باشد که امروزه خواص آن مبنی بر کاهش اثرات مخرب تنش خشکی گزارش شده است (Rosi, 2018). تنش خشکی علاوه بر کاهش رشد رویشی و تغییر در ساختارهای آناتومیکی گیاه، از طریق ایجاد تنش ثانویه نظیر تنش اکسیداتیو، سبب تغییر در مسیرهای سنتز ترکیبات و متابولیت‌های ثانویه می‌شود (Sharma *et al.*, 2012). تنش اکسیداتیو ناشی از تنش کمبود آب به این معنی می‌باشد که تولید گونه‌های فعال اکسیژن[1] سبب آسیب رساندن به غشاء سلولی و تخریب برخی از آنزیم‌ها می‌شود (Zheng *et al.*, 2007) مطالعات فراوان حاکی از افزایش تجمع گونه‌های فعال اکسیژن تحت تنش خشکی است (Hassanuzzman *et al.*, 2014). سوپر اکسید دیسموتاز، کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز، گلوتاتیون ردوکتاز از مهم‌ترین آنزیم‌های خنثی‌کننده گونه‌های فعال اکسیژن در گیاهان می‌باشند (Fung *et al.*,2004). تیتانیوم با تاثیر بر فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه باعث افزایش فعالیت آنـزیم روبیسـکو، فعالیـت فسفوریلاسـیون نـوریکلروپلاسـت، فعالیت آنزیم‌های کاتالار، نیترات ردکتـاز و پراکسـیداز مـی‌شـود (Khater, 2015). محققین، دلیل افزایش فعالیت این آنزیم‌هـا تحـت تـأثیر تیمـار تیتانیوم را ناشی از افزایش جذب آهن دانسته‌اند (Mahmmodzadeh *et al.*,2013). همچـنین بـا کـاهش رادیکال آزاد اکسیژن و مالون–دی‌آلدئید و افزایش آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث کاهش اثرات منفی تنش می‌شود (Zheng *et al.*, 2007). آنزیم کاتالاز[2] و آسکوربات پراکسیداز[3] در حذف پراکسید هیدروژن نقش مهمی ایفا می‌کنند و هرکدام میل ترکیبی متفاوتی با این نوع از گونه‌های فعال اکسیژن دارند.طی تحقیقی گزارش شد که اثر غلظت‌های پایین نانو ذرات تیتانیوم (۰/۵ و ۱ میلی‌گرم بر لیتر) ۸۷ درصد در مقایسه با شاهد موجب افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز گردید ولی افزایش غلظت (۱۰ تا ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر) موجب کاهش در فعالیت این آنزیم شد (Usatii, 2017). سوپر اکسید دیسموتاز یکی از آنزیم‌هایی است که تبدیل O^{-2} به O_2 و آب را کاتالیز می‌کند (Hafis *et al.*,2011). افزایش این آنزیم در شرایط تنش کمبود آب تحت تیمار نانو دی‌اکسید تیتانیوم شاید به‌عنوان اولین واکنش مستقیم به تشکیل O^{-2} باشد (Ghorbanpour *et al.*, 2015). لی و همکاران (Li *et al.*, 2008) گزارش کردند که کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم موجب کاهش اثرات اکسیداتیو در کلروپلاست اسفناج در اثر افزایش فعالیت آنزیم‌های آسکوربات پراکسیداز، سوپر اکسید دیسموتاز، پراکسیداز و کاتالاز می‌گردد. سالیسیلات یکی از تنظیم‌کننده‌های درونی رشد و از ترکیبات طبیعی فنولی است که در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک در گیاهان مشارکت دارد (Rao *et al.*, 2012). از این فرآیندهای فیزیولوژیک می‌توان به جذب یون‌ها، نفوذپذیری غشاها، فتوسنتز، جوانه‌زنی، رشد و نمو گیاه اشاره نمود (Talebi *et al.*, 2012). در بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر برخی از ویژگی‌های زراعی در گندم گزارش شده است که محلول‌پاشی نانو ذرات در سطح احتمال یک درصد اختلاف معنی‌داری در ارتفاع بوته، وزن سنبله، عملکرد دانه و شاخص برداشت در شرایط نرمال و تنش خشکی ایجاد می‌کند. همچنین نتایج نشان داد که عملکرد دانه در شرایط خشکی با محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم ۰/۰۲ درصد، ۲۳ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابد (Jaberzadeh *et al.*, 2010). معاونی و همکاران (Moaveni *et al.*, 2011) بیان کردند که محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم منجر به افزایش عملکرد دانه در گیاه جو می‌شود. سالیسیلات (SA) باعث کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز در گیاه شده و به دنبال آن افزایش تجمع مولکول‌های پراکسید هیدروژن صورت می‌گیرد. افزایش پراکسید هیدروژن می‌تواند به‌عنوان پیام‌بر ثانویه موجب فعال‌سازی پروتئین‌هایی با وزن مولکولی کم مرتبط به بیماری‌زایی شده و در نتیجه از طریق افزایش فعالیت آنزیم‌های دفاعی باعث افزایش مقاومت گیاه در مقابل عوامل بیماری‌زا گردد که به آن مقاومت اکتسابی سیستمیک می‌گویند (Wang and Li, 2006). با عنایت به این‌که بخش وسیعی از زمین‌های زیر کشت در ایران دارای شرایط آب و هوایی خشک و نیمه‌خشک است و با توجه به این که تنش خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل اثرگذار در تولید گیاهان زراعی در کشور می‌باشد، از این‌رو حصول بالاترین میزان عملکرد با مصرف حداقل آب ممکن در کوتاه‌ترین زمان با کاربرد نانو ترکیباتی چون دی‌اکسید تیتانیوم و سالیسیلات در مقابل روش‌های به‌نژادی که اغلب بلندمدت و هزینه‌بر هستند ضروری به نظر می‌رسد که پژوهش حاضر نیز در راستای سنجش اثرات محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسیدسالیسیلیک بر عملکرد دانه ذرت و برخی تغییرپذیری‌های بیوشیمیایی ذرت سینگل کراس ۷۰۴ تحت تنش کمبود آب صورت می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش طی سال زراعی ۱۳۹۷ در ایستگاه تحقیقاتی دانشکده‌ی کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی تبریز بر روی هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ ذرت دانه‌ای به‌صورت اسپلیت پلات فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. عامل اصلی تنش کمبود آب در سه سطح آبیاری در ۱۰۰ درصد رطوبت

1- Reactive oxygen species (ROS)
2- Catalase (CAT)
3- Ascorbate peroxidase (APX)

قابل دسترس، آبیاری تا ۷۵ درصد رطوبت قابل دسترس و آبیاری تا ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس و ترکیب فاکتوریلی کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم (در سه سطح صفر، ۰/۰۱ و ۰/۰۳ درصد) و اسید سالیسیلیک (در دو سطح صفر و نیم درصد) به‌عنوان عامل فرعی در نظر گرفته شدند. هر کرت شامل چهار ردیف کاشت به طول چهار متر، فاصله بین ردیف‌ها ۷۵ سانتی‌متر و فاصله بوته‌ها روی ردیف ۲۵ سانتی‌متر بود. فاصله هر کرت فرعی با کرت فرعی دیگر ۷۵ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های اصلی از هم‌دیگر به‌دلیل وجود تنش آبی ۳ متر در نظر گرفته شد. محلول‌پاشی روی اندام هوایی سه بار طی فصل رشدی و در مراحل ۱۰–۸ برگی، ظهور تاسل و پر شدن دانه‌ها انجام شد. مشخصات نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم مصرف شده در جدول ۱ نشان داده شده است. جهت تعیین زمان آبیاری در تیمارهایی که تنش در آن‌ها اعمال گردید، ابتدا ظرفیت مزرعه‌ای خاک اندازه‌گیری شده و سپس شاهد بر اساس ظرفیت مزرعه‌ای و سایر تیمارها بر اساس سطوح تنش‌ها آبیاری شدند. آبیاری برحسب نیاز کانوپی و بسته به شرایط آب و هوایی منطقه انجام و از مرحله ۱۰–۸ برگی به بعد با توجه تخلیه رطوبت از خاک با توجه به شرایط تبخیر و تعرق اعمال شدند. به‌منظور افزایش دقت در آبیاری‌ها، میزان رطوبت خاک توسط دستگاه TDR نیز همه روزه مورد ارزیابی قرار می‌گرفت. برای تعیین ظرفیت مزرعه‌ای از دستگاه صفحات فشار استفاده شد. بدین ترتیب که نمونه‌هایی از خاک مزرعه برداشت و سپس نمونه‌های خاک اشباع شدند. نمونه‌های اشباع‌شده در دستگاه صفحه فشار روی صفحات سرامیکی قرار داده شدند. سپس به آهستگی هوای داخل محفظه افزایش یافت تا به فشار یک‌سوم بار (۰/۳ بار) رسید. این فشار در خاک‌های رسی ۰/۳، در خاک‌های شنی ۰/۱ و به‌طور متوسط ۰/۲ بار می‌باشد. در این آزمایش با توجه به بافت خاک، این میزان فشار ۰/۳ بار در نظر گرفته شد (Khalilvand Behrouzyar, 2017). دستگاه به‌منظور ایجاد تعادل در سیستم به مدت ۲۴ ساعت در همان حال رها گردید. پس ازاین مدت و زمانی که دیگر از لوله‌ها آبی خارج نمی‌شد هوای محفظه خالی و نمونه‌های خاک بلافاصله در آزمایشگاه به‌وسیله ترازوی حساس با دقت ۰/۰۱ گرم توزین شدند. سپس نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار گرفتند. پس از توزین خاک خشک شده مقدار رطوبت وزنی خاک در حالت ظرفیت مزرعه‌ای با استفاده از رابطه (۱) به‌دست آمد (Luxmore, 1990):

$$\theta m = \frac{Mw - Ms}{Ms} \times 100 \qquad (۱)$$

در این رابطه θm مقدار رطوبت وزنی،Mw وزن خاک مرطوب و Ms وزن خاک خشک برحسب گرم می‌باشد. بعد از مشخص شدن رطوبت وزنی خاک در حالت ظرفیت مزرعه‌ای، مقدار رطوبت نقطه پژمردگی نیز در فشار ۱۵ بار به همان ترتیب اندازه‌گیری و تفاضل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و رطوبت نقطه پژمردگی، به‌عنوان رطوبت قابل دسترس در نظر گرفته شد (Khan *et al.*, 2017). پس از مشخص شدن میزان رطوبت قابل دسترس، هر روز از خاک نمونه‌برداری شده و میزان رطوبت وزنی خاک تعیین شد و فواصل دور آبیاری در تیمارهای مختلف به‌دست آمد.

جدول ۱- مشخصات نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم (آناتاز) مصرف شده

Table1- Characteristic of TiO_2 nanoparticles (anatase) used in the experiment

درصد خلوص %Purity	ظاهر نانو دی‌اکسید تیتانیوم Appearance of TiO_2	متوسط اندازه نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم Average particular size of TiO_2(APS)	سطح مخصوص نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم Special surface area of TiO_2 (SSA)	کشور تولیدکننده Producing country
99.9%	پودر سفید With powder	30 nm	>50 m^2g^{-1}	آلمان Germany

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز به روش جیانوپولوتیس و رایز (Giannopolities andRies, 1977) اندازه‌گیری شده و فعالیت آنزیمی مطابق روش (Loury *et al.*, 1951) به‌ازای میکرو مول بر گرم وزن تر بیان گردید.

فعالیت آنزیم کاتالاز در برگ

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم کاتالاز به روش چاکماک و هورست (Cakmak and Horst, 1991) انجام و فعالیت آنزیمی به ازای تغییرات جذب به میلی‌گرم پروتئین در دقیقه محاسبه گردید.

فعالیت آسکوربات پراکسیداز در برگ

بر اساس روش ناکانو و آسادا (Nakano and Asada, 1981) و به‌ازای هر میلی‌گرم پروتئین در عصاره آنزیمی فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز اندازه‌گیری شد.

محتوای کلروفیل

مقدار کلروفیل طبق روابط پورا (Porra, 2002) برای کلروفیل a (رابطه ۲)، کلروفیل b (رابطه ۳) و مجموع کلروفیل‌های a و b (رابطه ۴) محاسبه شد.

$$Chl\ a\ (\mu g/ml) = 12.25\ E^{663} - 2.55\ E^{645} \qquad (۲)$$

$$Chl\ b\ (\mu g/ml) = 20.31\ E^{645} - 4.91\ E^{663} \qquad (۳)$$

$$Total\ Chl = 17.76\ E^{645} + 7.34\ E^{663} \qquad (۴)$$

به هنگام رسیدگی فیزیولوژیکی دانه‌ها، یعنی در زمانی‌که دم سنبله زرد شد، برداشت نهایی صورت گرفت. برای تعیین عملکرد دانه از ردیف‌های ۲ و ۳ پس از حذف اثرات حاشیه‌ای از بالا و پایین کرت، بوته‌های باقیمانده از وسط هر کرت بریده شده و اندازه‌گیری صورت گرفت .تجزیه واریانس و مقایسه‌ی میانگین داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MSTATC انجام گرفت. میانگین‌ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مقایسه و شکل‌ها توسط برنامه EXCEL ترسیم شدند.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک تحت سطوح مختلف تنش کمبود آب بر صفات فعالیت آنزیم کاتالاز، آسکوربات پراکسیداز در سطح احتمال پنج درصد و محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. همچنین اثر محلول‌پاشی SA تحت تنش کمبود آب بر صفت سوپر اکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود. اثر متقابل محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ در سطوح مختلف تنش کمبود آب نیز بر صفت سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار و اثر محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ و SA نیز بر صفت سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

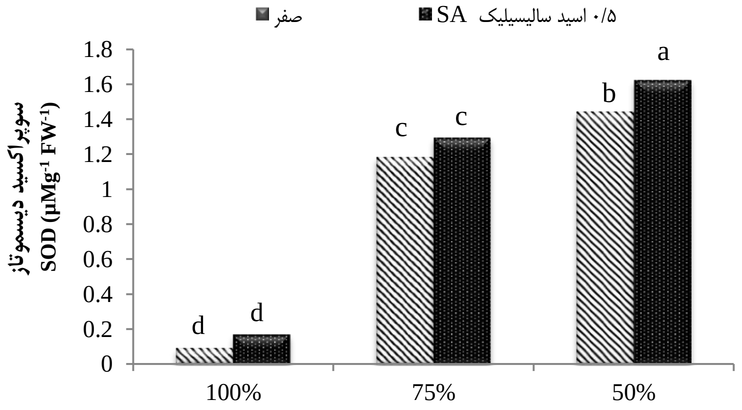
جدول ۲- تجزیهٔ واریانسصفات ارزیابی شده ذرت تحت تأثیرتنش کمبود آب و محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک
Table2- The analysis of variance traits of corn under water deficit stress, TiO_2 and salicylic acid

منابع تغییر S.O.V		درجه آزادی d.f	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase	کاتالاز Catalase	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase	کلروفیل a Chl a	کلروفیل b Chl b	کلروفیل کل Total Chl	عملکرد دانه Seed yield
Rep	بلوک	2	0.004 ns	0.00048**	0.00007ns	72.28**	67.70**	296**	172 ns
WDS	تنش کمبود آب	2	9.846**	0.002**	0.121**	31.29**	14.78**	88.2**	121446**
Error1	خطای۱	4	0.019	0.0000046	0.001	0.005	0.088	0.078	411
SA	اسیدسالیسیلیک	1	0.069*	0.001**	0.046**	1.236**	0.283*	4.693**	50585**
WDS×SA	تنش × اسید سالیسیلیک	2	0.083**	0.000041*	0.005*	10.39	0.222*	8.539**	5947**
TiO_2	نانو دی اکسید تیتانیوم	2	0.447**	0.002**	0.020**	0.547**	0.113 ns	1.88**	49696**
WDS×TiO_2	تنش × تیتانیوم	4	0.101**	0.00030**	0.003 ns	3.47**	0.367**	2.727**	3124**
SA× TiO_2	سالیسیلیک× تیتانیوم	2	0.040*	0.00024**	0.002 ns	0.416**	0.414**	3.922**	20834**
WDS×SA× TiO_2	تنش× سالیسیلیک× تیتانیوم	4	0.014 ns	0.00039*	0.004*	3.51**	2.02**	6.643**	3191*
Error2	خطای ۲	30	0.011	0.00012	0.001	0.002	0.066	0.075	740
CV%	ضریب تغییرات ٪	-	10.59	3.72	8.11	0.59	6.28	2.34	4.52

ns، * ،** به‌ترتیب غیر معنی‌دار، معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪

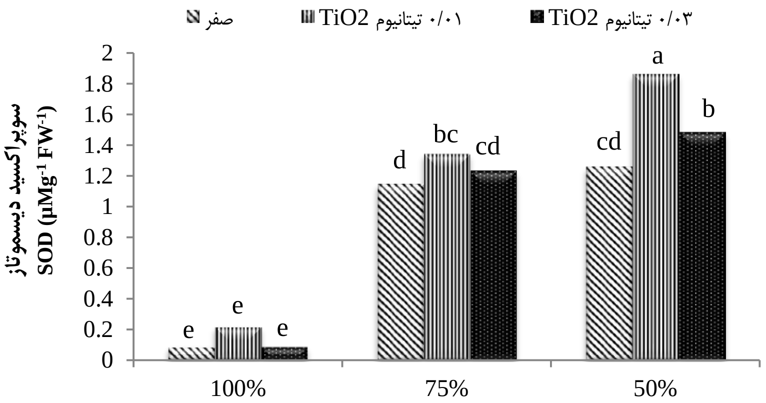
ns, * and ** : Non significant, significant at 5% and 1% respectively,
WDS: Water Deficit Stress, SA: Salicylic Acid, TiO_2: Nano Dioxide Titanium

محلول‌پاشی با ۰/۵ درصد SA در شرایط آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز را افزایش داد در حالی‌که عدم محلول‌پاشی در شرایط آبیاری کامل (۱۰۰ درصد رطوبت قابل دسترس) فعالیت آنزیم پراکسیداز را کاهش داد (شکل ۱). همچنین تحت شرایط آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس، محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد $n\text{-}TiO_2$ موجب افزایش فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز شد در حالی‌که در شرایط آبیاری کامل و عدم کاربرد $n\text{-}TiO_2$ کم‌ترین فعالیت این آنزیم وجود داشت (شکل ۲). با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد $n\text{-}TiO_2$ تاثیر مثبتی بر فعالیت آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در شرایط کاربرد و عدم کاربرد SA را داشته است. بیشترین فعالیت این آنزیم در شرایط محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد $n\text{-}TiO_2$ و ۰/۵ درصد SA بود که اختلاف معنی‌داری با محلول‌پاشی با ۰/۰۳ درصد $n\text{-}TiO_2$ و ۰/۵ درصد SA نداشت.



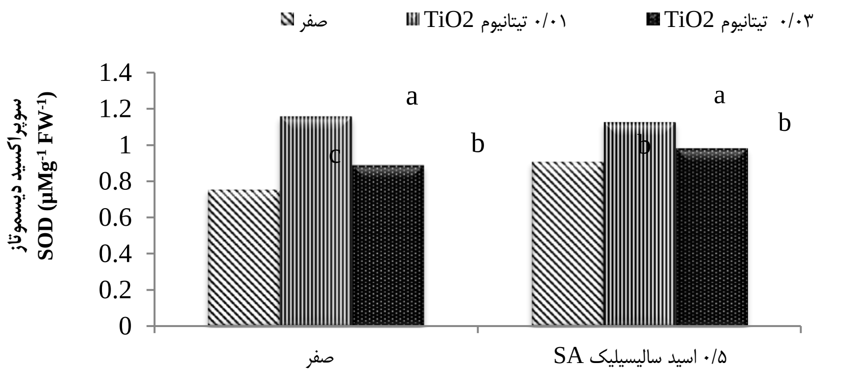
شکل ۱- اثرات محلول‌پاشی SA تحت تنش کمبود آب بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

Figure 1- Effects of salicylic acid foliar application under water deficit stress on superoxide dismutase activity



شکل ۲- اثرات محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$ تحت تنش کمبود آب بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

Figure 2- Effects of TiO_2 foliar application under water deficit stress on superoxide dismutase activity



شکل ۳- اثرات محلول‌پاشی $n\text{-}TiO_2$و SA بر فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

Figure 3- Effects of TiO_2 and SA foliar application on superoxide dismutase activity

سوپراکسید دیسموتاز نوعی آنتی‌اکسیدان قوی است که اولین ماده‌یتولید شده از احیای یک‌ظرفیتی اکسیژن، یعنی رادیکال سوپراکسید را از بین می‌برد از این رو به سوپراکسید دیسموتاز دفاع اولیه در مقابل رادیکال‌های آزاد اکسیژن اطلاق می‌شود (Alscher *et al.*, 2002). در پژوهشی بر روی دو گیاه لوبیا و گوجه‌فرنگی مشاهده شد که کاربرد خارجی SA در شرایط تنش، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان از جمله سوپر اکسید دیسموتاز و پراکسیداز را افزایش داد (Senaratna *et al.*, 2000). آگاروال و همکاران (Agarwal *et al.*,

2005) در بررسی نقش کاربرد ABA، سالیسیلیک اسید، کلسیم و پراکسید هیدروژن بر القای آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی در گیاهچه‌های گندم گزارش کردند که کاربرد یک میلی‌مولار سالیسیلیک اسید اثر موثری بر افزایش فعالیت آنزیم‌های سوپراکسید دیسموتاز، آسکوربیک پراکسیداز و کاتالاز داشت. آنزیم‌های کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز نقش موازی و مشابهی را در سیستم دفاعی گیاه ایفا می‌نمایند به‌طوری‌که وظیفه هر دو آنزیم، سم‌زدایی و تجزیه پراکسید هیدروژن تولیدشده در سلول‌ها می‌باشد (Ariano *et al.*, 2005). افزایش فعالیت این آنزیم‌ها نشان‌دهنده مهار کارآمد پراکسید هیدروژن می‌باشد که این افزایش در نتایج تحقیقات انجام‌شده درباره یونجه (Wen-Bin *et al.*, 2009) گزارش شده است. با توجه به این دلایل پیشنهاد شده است که آسکوربات پراکسیداز ممکن است یک تنظیم‌کننده و کنترل‌کننده داخل سلولی خوبی جهت حفظ تعادل گونه فعال اکسیژن باشد (Sairam and Tyagi, 2004). به هنگام قرار گرفتن گیاهان در شرایط تنش‌های محیطی، گیاهان از طریق مکانیسم آنزیمی و با سنتز آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز رادیکال‌های اکسیژن را جمع‌آوری نموده و به پراکسید هیدروژن تبدیل می‌کنند. این ترکیب در ادامه توسط آنزیم‌هایی نظیر کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز به آب و اکسیژن تبدیل می‌شوند (Sairam and Tyagi, 2004).

بر اساس نتایج بیشترین فعالیت آنزیم کاتالاز در محلول‌پاشی ۰/۰۱ درصد TiO_2 بدون کاربرد SA تحت شرایط آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس بود. همچنین محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد n-TiO2 و ۰/۵ درصد SA تحت رطوبت ۵۰ درصد قابل دسترس بیش‌ترین مقدار فعالیت آنزیم آسکوربات پراکسیداز را داشت (جدول ۲). محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد n-TiO_2 و ۰/۵ درصد SA تحت آبیاری کامل (۱۰۰ درصد رطوبت قابل دسترس) بیشترین محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل را داشت. عدم کاربرد n-TiO_2 و SA تحت آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس نیز کم‌ترین محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل را داشت (جدول ۲). کاهش میزان کلروفیل می‌تواند به‌واسطه کاهش سنتز کلروفیل و همچنین ناشی از تخریب آن باشد. تخریب مولکولی کلروفیل به‌علت جداشدن زنجیره فیتولی از حلقه پورفیرین در اثر رادیکال‌های آزاد اکسیژن و یا آنزیم کلروفیلاز صورت می‌گیرد (Parvaiz and Satyawati, 2008). تنش کمبود آب با بستن روزنه‌ها و تخریب کلروفیل و کلروپلاست باعث کاهش فتوسنتز می‌شود (Wen-Bin *et al.*, 2009). نوری و همکاران (Nouri *et al.*, 2017) در بررسی اثر محلول‌پاشی نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم بر کلروفیل، عملکرد و اجزای عملکرد عدس نشان دادند که تیمار نانو ذرات تیتانیوم با مقادیر ۰/۰۵درصد و ۰/۰۲درصد به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر میزان کلروفیل a داشت. همچنین مصرف نانو ذرات تیتانیوم در مرحله ۵۰ درصد گلدهی و ۶۰ درصد ساقه‌دهی به‌ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر میزان کلروفیل a داشته است. بر اساس همین تحقیق تیمارهای شاهد دارای بیش‌ترین میزان کلروفیل b در هر دو مرحله بودند و کم‌ترین میزان کلروفیل b نیز در تیمار ۰۱/ ۰درصد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در مرحله ۶۰ درصد ساقه‌روی مشاهده شد. در مطالعه‌ای علت تجمع کلروفیل در غلظت ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط آبیاری معمولی را به اثرات مکمل مواد مغذی مانند منیزیم، آهن و گوگرد بیان کردند. استفاده از نانو دی‌اکسید تیتانیوم می‌تواند ساختار کلروفیل را بهبود بخشد، جذب نور را افزایش دهد و تشکیل کلروفیل را آسان‌تر کند. همچنین، با انتقال انرژی نور به الکترون‌های فعال، بر فعالیت‌های شیمیایی و در نهایت بر فتوسنتز تأثیر می‌گذارد (Mahmoodzadeh *et al.*, 2013). نتایج محمدی و همکاران (Mohammadi *et al.*, 2017) نشان داد که میزان کلروفیل در ۱۰ پی‌پی‌ام نانو ذره دی اکسید تیتانیوم کاهش می‌یابد. استفاده از اسپری نانو TiO_2 بر روی گیاه ذرت در مراحل مختلف رشدی موجب افزایش معنی‌دار رنگدانه فتوسنتزی شد به‌طوری‌که بیشترین میزان افزایش در کلروفیل a، b، کارتنوئیدها و آنتوسیانین به‌وسیله اسپری نانو ذرات در مراحل تولید مثلی (ظهور گل نر و ماده) حاصل شد (Morteza *et al.*, 2013). محلول‌پاشی با نانو دی‌اکسید تیتانیوم در تمامی تیمارها موجب افزایش عملکرد دانه در متر مربع شد به طوری که کاربرد ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم بدون کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل ۳۱ درصد عملکرد دانه را نسبت به شاهد و ۹۲ درصد نسبت به عدم کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک تحت آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس که کمترین تیمار را به خود اختصاص داده بود افزایش داد (جدول ۳). با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که احتمالاً با کاربرد نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم رشد گیاه تحت تاثیر قرار گرفته در نتیجه با افزایش کلروفیل و فتوسنتز گیاه پتانسیل تولید اندام‌های زایشی بهبود یافته و در نتیجه باعث عملکرد دانه افزایش یافته است. بر اساس تحقیق خلیل‌وند بهروزیار و همکاران (Khalilvand Behrouzyar *et al.*, 2019) محلول‌پاشی با غلظت ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم تحت شرایط آبیاری کامل در مقایسه با عدم محلول‌پاشی این ترکیب تحت شرایط ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس و شاهد عملکرد بلال را به‌ترتیب ۵۸ و ۱/۸ درصد افزایش داد. در کل محلول‌پاشی با غلظت ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم در شرایط تنش کمبود آب توانست فعالیت آنزیم‌های مرتبط با کاهش اثر مخرب تنش را افزایش داده و در نهایت منجر به افزایش عملکرد بلال در شرایط مشابه و عدم مصرف این ترکیب شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم تحت شرایط ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس بیش‌ترین فعالیت آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز را داشت. همچنین محلول‌پاشی با ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۵ درصد اسید سالیسیلیک تحت رطوبت ۵۰ درصد قابل دسترس بیش‌ترین مقدار فعالیت آنزیم کاتالاز را به خود اختصاص داد. کاربرد ۰/۰۱ درصد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و ۰/۵ درصد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل در مقایسه با عدم کاربرد نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک تحت آبیاری ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس به‌ترتیب ۷۹ درصد و۲/۵ برابر و ۸۲ درصد محتوای کلروفیل a، b و کلروفیل کل را افزایش داد. در تحقیق حاضر با توجه به تأثیر مثبتی که نانو ذرات دی‌اکسید تیتانیوم در بهبود فعالیت آنزیم‌های مؤثر در فرایند فتوسنتز و تعدیل اثرات مخرب تنش کمبود آب داشت، در نتیجه افزایش ۳۱ درصدی در عملکرد دانه نسبت به شاهد و شرایط عدم مصرف و کم آبیاری ایجاد شد.

جدول۲- اثر محلول‌پاشی نانو دی‌اکسید تیتانیوم و اسید سالیسیلیک در سطوح مختلف تنش کمبود آب بر صفات مورد مطالعه

Table2- Effect of TiO_2 and salicylic acid under water deficit stress on traits of study

تنش کمبود آب Water deficit stress	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	نانو دی اکسید تیتانیوم TiO_2	آسکوربات پراکسیداز Ascorbate peroxidase (mg.pro.min)	کاتالاز Catalase (mg.pro.min)	کلروفیل a Chl a (mg g^{-1} FW^{-1})	کلروفیل b Chl b (mg g^{-1} FW^{-1})	کلروفیل کل Total Chl (mg g^{-1} FW^{-1})	عملکرددانه Seed yield (g m^{-2})
۱۰۰ درصد رطوبت قابل دسترس 100 % FC	صفر 0	0	0.271k	0.0653k	8.377f	5.710a	14.38b	620.8cd
		0.01	0.350ghij	0.0856fghi	7.937h	5.920c	12.57e	817.6a
		0.03	0.340ghij	0.0816ij	8.517e	4.960b	13.23cd	761.9a
	۰/۵ درصد 0.5	0	0.373efg	0.843ghi	7.293i	4.120cd	11.58f	635.4bcd
		0.01	0.377efg	0.0923de	10.71a	7.280a	16.26a	700.7b
		0.03	0.368efgh	0.0876efghi	9.193b	4.540bc	13.63c	642.4bc
۷۵ درصد رطوبت قابل دسترس 75 % FC	صفر 0	0	0.293jk	0.0776j	8.977c	4.250cd	13.54c	595.4cde
		0.01	0.302ijk	0.0933de	8.763d	4.540bc	13.29cd	698.4b
		0.03	0.312hijk	0.0910ef	8.517e	4.310c	12.85de	597cde
	۰/۵ درصد 0.5	0	0.355fghi	0.0883efgh	8.137g	4.310c	12.45e	529.8efg
		0.01	0.422de	0.1077c	6.043l	3.640def	10.71g	570.2d-g
		0.03	0.411def	0.0900efg	7.213m	2.650h	9.237ij	522.2fg
۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس 50 % FC	صفر 0	0	0.446cd	0.0820hij	5.960j	2.870gh	8.888j	424.2h
		0.01	0.497bc	0.1283a	6.290j	3.343fg	9.480hij	626.3cd
		0.03	0.484bc	0.1183b	6.183k	3.263fgh	9.120ij	588.1c-f
	۰/۵ درصد 0.5	0	0.413def	0.0923de	6.013l	4.02cde	10.05h	525.8fg
		0.01	0.587a	0.0980d	6.333j	3.110fgh	9.460hi	547.7efg
		0.03	0.515b	0.09133ef	6.370i	3.473efg	9.190ij	504.6g

میانگین‌هایی که در هر ستون دارای حداقل یک حرف مشترک می‌باشند در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

Means in the same columns, followed by the same letter are not significantly difference ($P<0.05$).

References

1. Agarwal, S., Sairam, K. R., Srivastava, G. C., Aruna, T., and Meena, C. R. 2005. Role of ABA,Salicylic acid, calcium and hydrogen peroxide on antioxidant enzyme induction in wheatseedlings. Plant Science 169: 559-570.
2. Ahmad, P. 2016.Water stress and crop plants. First edition. John Wiley & Sons, Ltd, 466 pp.
3. Alscher, R. G., Erturk, N., and Heath, L. S. 2002. Role of superoxide dismutase (SOD) in controlling oxidative stress in plant. Experimental Botany 153: 1331-1341.
4. Anjum, S., Xie, X., Wang, L., Saleem, M., Man, C., and Lei, W. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African Journal of Agriculture Research 6(9): 2026-2032.
5. Aref, I., El Atta, H., El Obeid, M., Ahmed, A., Khan, P., and Iqbal, M. 2013. Effect of water stress on relative water and chlorophyll contents of *Juniperus procera* Hochst. Ex Endlicher in Saudi Arabia. Life Science Journal 10 (4): 681-685.
6. Ariano, S., Bartolomeo, D., Cristos, X., and Andras, M. 2005. Antioxidant defences in Olive trees during drought stress: changes in activity of some antioxidant enzymes. Functional Plant Biology 32: 45-53.
7. Cakmak, I., and Horst, W. 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tip of soybean (*Glycine max*). Plant Physiology 83:463-468.
8. Fadeel, B., Pietroiusti, A., and Shvedova, A. 2017. Adverse Effects of Engineered Nanomaterials. Exposure, Toxicology, and Impact on Human Health. Elsevier Academic Press, New York. Pp. 468.
9. Fung, R. W. M.,Wang, C. Y., Smith, D. L., Gross, K. C., and Tiam, M. 2004. MeSA and MeJA increase steady-state transcript levels of alternative oxidase and resistance against chilling injury in sweet peppers. Plant Science 166: 711-719.
10. Ghorbanpour, M., Hatami, M., and Hatami, M. 2015. Activating antioxidant enzymes, hyoscyamine and scopolamine biosynthesis of *Hyoscyamus niger* L. plants with nano-sized titanium dioxide and bulk application. Acta agriculturae Slovenica 105 (1): 23-35.
11. Giannopolities, C. N., and Ries, S. K. 1977. Superoxide dismutase: I. Occurrence in higher plants. Plant Physiology 59: 309-314.
12. Hafis, C., Romerro-Puertas,M. C., Rio, L. A., Abdelly, C., and Sandalio, L. M. 2011. Antioxidative response of *Hordem maritimum* L. to potassium deficiency. Acta Physiologiae Plantarum 33: 193-202.
13. Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Gill, S. S., and Fujita, M. 2014. Drought stress responses in plants, oxidative stress, and antioxidant defense. In: Gill, S. S., Tuteja, N. (ed.): Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance 18: 209-249.
14. Jaberzadeh, A., Moaveni, P., Tohidi Moghadam,H.R., and Moradi,O. 2010.Assessment of particular of nano titanium in wheat agricultural characterization onthe drought steers. Journal of Crop Ecophysiology 2: 295-301. (in Persian).
15. Kamanga, R. M., Mbega, E., and Ndakidemi, P. 2018. Drought Tolerance Mechanisms in Plants: Physiological Responses Associated with Water Deficit Stress in *Solanum lycopersicum*. Advances in Crop Science and Technology, 6 (3): 1-8.
16. Khalilvand Behrouzyar, E., Yarnia, M., and Ghasemi, A. 2019. Effect of nano-TiO_2 foliar application on ear yield and activity of some antioxidant enzymes of sweet corn under water deficit stress. Crop Physiology Journal 11 (43): 105-118. (in Persian).
17. Khalilvand Behrouzyar, E. 2017. Effect of Seed Priming with Ethanol, Methanol, Boron and Manganese on some of Morphophysiological Characteristics of Rapeseed (*Brassica napus* L.) under Water Deficit Stress. Journal of Crop Ecophysiology 11 (4): 805-820. (in Persian).
18. Khan, M.N., Mobin, M., Abbas, Z. K., AlMutairim, K. A., and Siddiqui, Z. H. 2017. Role of nanomaterials in plants under challenging environments. Plant Physiology and Biochemistry 110: 194-209.
19. Khater, M. S. 2015. Effect of Titanium Nanoparticles (TiO_2) on Growth, Yield and Chemical Constituents of Coriander Plants. Arab Journal of Nuclear Science and Applications, 48 (4): 187-194.
20. Lei, Z., Mingyu, S., Xiao, W., Chao, L., Chunxiang, Q., Liang, C., Hao, H., Xiao-qing, L., and Fashui, H. 2008. Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. Biological Trace Element Research 121: 69-79.
21. Leng, G., and Hall, L. 2019. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. Science of the Total Environment 654: 811-821.
22. Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., and Rand, R. J. 1951. Protein measurement with the folin phenol reagent. Journal of Biological Chemistry 193: 265-275.
23. Luxmore, B. 1990. Methods of soil Analysis. Part II, 3th Edition, pp.493-59.
24. Mahmoodzadeh, H., Aghili, R., and Nabavi, M. 2013. Physiological effect of TiO_2 nanoparticles on wheat (*Triticum aestivum*). Technical Journal of Engineering and Applied Sciences 3(14): 1365-1370.
25. Moaveni, P., Talebi, R., Farahani, H.A., and Maroufi, K. 2011b. Study of TiO_2 nano particles spraying effect on the some physiological parameters in barley (*Hordem Vulgare* L.). Advances in Environmental Biology 5(7): 1663-1667.

26. Morteza, E., Moaveni, M., Aliabadi Farahani, H., and Kiyani, M. 2013. Study of photosynthetic pigments changes of maize (*Zea mays* L.) under nano TiO_2 spraying at various growth stages. Springer Plus 247 (2): 1-5.
27. Mohammadi, H., Esmailpour, M., and Gheranpaye, A. 2017. Effects of TiO_2 nanoparticles and water deficit stress on morpho-physiological characteristics of dragonhead plants. Acta agriculturae Slovenica 107(2): 385-396.
28. Nakano,Y., and Asada, K. 1981. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. Plant and Cell Physiology 22 (5): 867-880.
29. Nouri, H., Moaveni, P., and Soltaanieh, M. 2017. Study of nano particle TiO_2 spraying on chlorophyll, yield and yield components of lentil (*Lens culinaris* Medik). Iranian Journal of Pulses Research 8 (2): 57-68. (In Persian).
30. Parvaiz, A., and Satyawati, S. 2008. Salt stress and Phyto-biochemical responses of plants. Plant Soil Environment 54: 89-99.
31. Porra, R. J. 2002. The chequered history of the development and use of simultaneous equations for the accurate determination of chlorophylls a and b. Photosynthesis Research 73: 149156.
32. Rao, S. R., Qayyum, A., Razzaq, A., Ahmad, M., Mahmood, I., and Sher, A. 2012. Role of foliar application of salicylic acid and L- Tryptophan in drought tolerance on maize. The Journal of Animal and Plant Sciences 22 (3): 768-772.
33. Rosi, H. S. 2018. Kalyanasundaram, Synthesis, characterization, structural and optical properties of titanium-dioxide nanoparticles using *Glycosmis cochinchinensis* leaf extract and its photocatalytic evaluation and antimicrobial properties. World News of Natural Sciences 17: 1-15.
34. Sairam, R., and Tyagi, A. 2004. Physiology and molecular biology of salinity stress tolerance in plants. Current Science 86(3): 407-421.
35. Senaratna, T., Touchell, D., Bunn, E., and Dixon, K. 2000. Acetyl salicylic acid (Aspirin) and salicylic acid induce multiple stress tolerance in bean and tomato plants. Plant Growth Regulation 30: 157-161.
36. Sharma, P., Jha, A., Dubey, R., and Pessarakli, M. 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. Journal of Botany 14: 1-26.
37. Talebi, S., Jafarpour, M., Mohammadkhani, A., and Sadeghi, A. 2012. The effect of different concentrations of salicylic acid and sodium chloride on Iranian Borage. International Journal of Agriculture and Crop Sciences 4:1348-1352.
38. Usatii, A., Besliu, A., and Efremova, N. 2017. Effect of Fe_3O_4 and TiO_2 nanoparticles on catalase activity and Β-carotene content at pigmented yeast strain Rhodootorula gracilis. Acta Universitatis Cibiniensis Series E: Food Technology 21 (1): 35-40.
39. Wang, L. J., and Li, S. H. H. 2006. Salicylic acid induced heat or cold tolerance in relation to Ca2+ homeostasis and antioxidant system in young grape plants. Plant Science 170: 685-694.
40. Wen-Bin, W., Yun-Hee, K., Haeng-Soon, L., Ki-Yong, K., and Xi-Ping, D. 2009. Analysis of antioxidant enzyme activity during germination of alfalfa under salt and drought stresses. Plant Physiology and Biochemistry 47: 570-577.
41. Zheng, L., Su, M., Liu, C. H., Li, C., Huang, H., Wu, X., Liu, X., Yang Gao, F., and Hong, F. 2007. Effects of Nanoanatase TiO_2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light Illumination. Biological Trace Element Research 119:68-76.

Iranian Journal of Field Crops Research
Vol. 18, No. 2, Summer. 2020, p. 241-250

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
جلد ۱۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۹، ص. ۲۵۰-۲۴۱

Effect of nano-TiO_2 and Salicylic Acid Foliar Application on Some Biochemical Changes of Corn S.C. 704 (*Zea mays* L.) under Water Deficit Stress

F. Shargi[1], E. Khalilvand Behrouzyar[2*]

Received: 07-02-2020
Accepted: 23-05-2020

Introduction

Drought is one of the most important causes of decline in agricultural productivity worldwide. TiO_2 is one of the materials that nowadays, its properties have been reported to reduce environmental impact. TiO_2 with increasing activity of PS II light reduction, activity of chloroplast photophosphorylation, rubisco enzyme, nitrate reductase enzyme activity, catalase and peroxidase and improving the content of some essential elements in plant tissues, increases the yield of different crops. Salicylate is one of the natural growth regulators and is a natural phenolic compound that contributes to the regulation of physiological processes in plants. In the study of the effect of nano-TiO_2 spraying on some of the agronomy characteristics of wheat, 0.02% nano-TiO_2 foliar application under drought stress conditions increased seed yield by 23% compared to non-foliar application. Considering that a large part of cultivated land in Iran has semi-arid climatic conditions and because of its special geographical position, in most parts of it, important abiotic stresses such as drought, salinity, and temperature decrease the yield and, in some cases, led also to failure of agriculture. Therefore, the aim of this study was to evaluate and identify important biochemical change of corn 704 single cross under water deficit stress and application of the TiO_2 and salicylic acid compound.

Materials and Methods

In order to investigate the effect of nano-TiO_2 and salicylic acid foliar application on some biochemical changes of corn 704 single cross under water deficit stress, an experiment was conducted in split plot factorial based on RCBD in three replications at the Research Station of the Islamic Azad University, Tabriz Branch, during growing seasons of 2017-2018. Treatments were three levels of water deficit stress (50, 75, and 100% filed capacity (FC)), three levels of the factorial combination of nano-TiO_2 (n-TiO_2) foliar application (non-application (control), 0.01, and 0.03), and two levels of salicylic acid (SA) foliar application (non-application and 0.5%). Field capacity was determined from the pressure plate machine. TiO2 foliar application on the shoot was performed three times during the growing season and in the stages of 8-10 leaf, tasselling, and grain filling. Irrigation was done according to the needs of the canopy and depending on the weather conditions of the region and irrigation treatments were applied from 8-10 leaves stage. superoxide dismutase (SOD) activity, catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX) activity, and chlorophyll (Chl) content were measured according to the Giannopolities and Ries (1977), Cakmak and Horst (1991), Nakano and Asada (1981), and Porra (2002) methods, respectively. The MSTAT-C software was used to analysis of variance and the means of the treatments were compared using the Duncan's test at 0.05 probability level.

Results and Discussion

N-TiO_2 and SA foliar application increased CAT, APX activity ($p < 0.05$) and content of Chl a, b, and total Chl ($p < 0.01$). Also, the interaction between SA and water deficit stress on SOD and interaction betweenn-TiO2 and SA on SOD ($p < 0.05$) was significant. Results showed that 0.01% n-TiO_2 foliar application under 50% water deficit stress had the highest SOD. Furthmore, 0.01% n-TiO_2 and 0.5% SA foliar application under 50% water deficit stress had the highest CAT. 0.01% n-TiO_2 and 0.5% SA foliar application under complete irrigation had 79%, 2.5 times and 82 % more than Chl a, b and total Chl compare non-use of n-TiO_2 and SA under 50% FC, respectively.

Conclusions

The results of this study showed that 0.01% n-TiO2 foliar application had the highest superoxide dismutase enzyme activity under 50 % FC. Also, 0.01% n-TiO2 and 0.5% SA foliar application under 50 % FC had the highest catalase enzyme activity. Use of 0.01% n-TiO2 and 0.5% SA under normal stress (50 % FC), increased 79%, 2.5 time and 82% Chl a, b and total Chl compare to control, respectively.

Keywords: Ascorbate peroxidase, Catalase, Chlorophyll content, Foliar application, Superoxide dismutase

1- MSc of Agronomy, Department of Agronomy and plant Breeding, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
2- Assistance Professor, Department of Agronomy and plant Breeding, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran
(*- Corresponding Author Email: e.khalilvand@iaut.ac.ir)